

# Modelo de propagación para exteriores mejorado para frecuencias de 50 MHz a 1.2 GHz

José María Zamanillo<sup>(1)</sup>, Constantino Pérez-Vega<sup>(1)</sup>, Isabel Zamanillo<sup>(2)</sup>.

[jose.zamanillo@unican.es](mailto:jose.zamanillo@unican.es), [perezvr@unican.es](mailto:perezvr@unican.es), [isabel.zamanilloB@unican.es](mailto:isabel.zamanilloB@unican.es)

<sup>(1)</sup> Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones

Universidad de Cantabria, Plaza de la Ciencia s/n 39005 Santander (Cantabria)..

<sup>(2)</sup> Dpto. de Tecnología Electrónica Ingeniería de Sistemas y Automática

Universidad de Cantabria, Escuela Técnica Superior de Náutica C/Gamazo 1 39004 Santander (Cantabria).

**Abstract-** An enhanced upgrade of a model for outdoor propagation at frequencies from 50 MHz up to 1.2 GHz is presented. The model, as well as the original one are mathematical characterizations of the FCC propagation curves F(50,50) in a wider bandwidth [1-2]. Some limitations of the original model have been mastered in the improved version presented here, namely, the model has been extended for distances of more than 40 mi (64 Km) and antenna heights up to 1800 m. Like its predecessor, the new model allows for the estimation of the median path loss, received power or electrical field strength, which usually is sufficient in a vast majority of practical applications for which a deeper knowledge of channel dynamics is not necessary.

## I. INTRODUCCIÓN

El modelo presentado en esta comunicación es válido en la predicción de cobertura de servicios de comunicaciones radioeléctricas, en particular de radiodifusión sonora y televisión en las bandas de VHF y UHF, constituyendo una extensión de modelos previos [1-2], basados en las curvas de propagación F(50,50) [3] de la Comisión Federal de Comunicaciones de los Estados Unidos. Al igual que su predecesor, el modelo no requiere de esfuerzo significativo de cómputo y puede implementarse fácilmente en una calculadora programable de bolsillo. El modelo original se planteó para distancias de 2.5 a 60 Km. y alturas de la antena transmisora de 30 a 600 m. Sin embargo, medidas realizadas a más de 40 Km mostraron desviaciones mayores de las reportadas inicialmente (1.25%), por lo que se revisó y corrigió el algoritmo de cálculo en la forma que se presenta aquí, empleando una matriz de más de 5000 puntos obtenidos mediante la aplicación java disponible en la página web de la FCC [9]. El modelo permite el cálculo de la atenuación media en función de la distancia y de la altura de la antena transmisora.

## II. BASES TEÓRICAS

Una caracterización clásica de la atenuación consiste en utilizar el factor de atenuación, en este caso el exponente de la distancia. Es decir, se asume que la potencia recibida no sigue una ley del inverso del cuadrado de la distancia como ocurre en el espacio libre, sino del inverso de la distancia elevada a un exponente que, en el caso de propagación en exteriores es, generalmente, mayor de 2 [4-6].

La razón de emplear este factor en lugar de la atenuación directamente, es para este trabajo, su reducido rango de valores que permite una caracterización estadística más fácil que para la atenuación directamente. De acuerdo a lo anterior, la potencia isotrópica recibida se expresa como:

$$P_{iso} = \frac{P_{rad}}{d^n} \left( \frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \quad \text{watt} \quad (1)$$

Donde  $P_{rad}$  representa la potencia isotrópica equivalente radiada (PIRE),  $d$  es la distancia entre las antenas transmisora y receptora en metros y  $\lambda$  la longitud de onda en metros.

El factor de atenuación  $n$ , el exponente de la distancia, conjuga los efectos de todos los mecanismos de propagación, y no se intentará aquí establecer una relación funcional entre dicho factor y los aspectos físicos del canal. Sin embargo, parece claro que cuanto mayores sean los efectos de los mecanismos de dispersión, tales como atenuación, difracción, reflexión, reflexión difusa, etc., menor será la potencia recibida y mayor el valor de  $n$ .

La atenuación en la trayectoria de propagación se expresa generalmente en dB de la siguiente forma  $L = 10 \cdot \log(P_{rad}/P_{iso})$  y de (1), puede calcularse como:

$$L = 10n \log_{10}(d) + L_0 \quad \text{dB} \quad (2)$$

Donde  $L_0 = 20 \cdot \log_{10}(4\pi/\lambda)$  es la atenuación a un metro de la antena transmisora, en el espacio libre. En las expresiones anteriores, no aparece una dependencia clara de  $n$  respecto a la frecuencia, distancia o altura de las antenas. En lo que respecta a su dependencia respecto a la frecuencia, se realizaron medidas a diversas frecuencias en las bandas de VHF y UHF, entre 100 y 800 MHz, de cuyos resultados se informa en [6], que indican que  $n$  no depende de la frecuencia, resultado que concuerda con la propia naturaleza de las curvas de propagación F(50,50). Por otro lado, la dependencia de  $n$  respecto a la distancia y altura de las antenas no es evidente, por lo que sería necesaria una gran cantidad de mediciones para establecer tal dependencia experimentalmente. En lugar de eso, se empleó un procedimiento indirecto utilizando la información que proporcionan las curvas F(50,50) para radiodifusión de televisión en VHF y UHF, con lo que se desarrolló un

modelo empírico [1], aplicable a propagación en exteriores para distancias entre 1 y 60 Km, con  $n$  como función de la distancia al receptor y de la altura de la antenna transmisora, el cual ha sido validado experimentalmente en [7]. Por otra parte, es evidente que  $n$  es también función de la altura de la antenna receptora. Las curvas F(50,50) están basadas en una altura fija de la antenna receptora de 9 m (30 pies) y, por consecuencia, el modelo aquí tratado se basa en esa altura fija para la antenna receptora. Para otras alturas es necesario efectuar correcciones. A mayor altura de la antenna receptora, menor el valor de  $n$ . La razón de seguir el procedimiento descrito antes radica en el hecho de que las curvas F(50,50) se han utilizado satisfactoriamente desde hace muchos años en la práctica de la ingeniería y proporcionan estimaciones adecuadas de la intensidad de campo  $e$ , indirectamente, de la potencia recibida y atenuación en una inmensa cantidad de situaciones prácticas. Tales curvas, en las que en buena medida se basaron las curvas del CCIR (UIT-R), fueron el resultado de numerosas mediciones realizadas en zonas geográficas diferentes, en distintos periodos de tiempo y proporcionan los valores medios de la intensidad de campo eléctrico para el 50% de las ubicaciones, durante el 50% del tiempo, por lo que reflejan información experimental fiable, no obtenida de modelos puramente teóricos.

Hay que mencionar también, que el modelo aquí tratado no pretende ser mejor que otros. Es un hecho bien conocido que los diversos modelos de propagación en uso, con frecuencia producen resultados controvertidos y que depende de la experiencia y el buen juicio del ingeniero la decisión final de qué modelo particular refleja mejor los resultados prácticos.

El modelo que aquí se presenta, al igual que el original [1] ofrece una alternativa de fácil aplicación en la práctica de la ingeniería en que es frecuente afrontar decisiones difíciles entre la teoría y la práctica.

### III. MODELO

Las curvas F(50,50) proporcionan valores medianos de la intensidad de campo eléctrico,  $E$ , para una potencia isotrópica equivalente radiada [ $P_{rad}$  en (1)] de 1 KW, a una

distancia  $d$  y una altura  $h$  de la antenna transmisora, de modo que la potencia isotrópica recibida puede obtenerse directamente de los valores de  $E$  y de (1) y (2):

$$P_{iso} = \frac{1}{480} \left( \frac{E\lambda}{\pi} \right)^2 \text{ watt} \quad (3)$$

En que  $E$  está expresado en V/m. Determinada así la potencia isotrópica recibida y conocida la potencia radiada (PIRE) en la dirección del receptor, el valor del factor de atenuación se calcula como::

$$n = \frac{P_{rad}(\text{dBw}) - P_{iso}(\text{dBw}) - L_0}{10 \log_{10}(d_{\text{metros}})} \quad (4)$$

Los valores de  $E$  utilizados para desarrollar el modelo se obtuvieron de las curvas F(50,50) en dos formas, una manteniendo constante la altura de la antenna transmisora y variando la distancia y otra, manteniendo constante la distancia y variando la altura de la antenna. Esto da lugar a tres posibles modelos para el factor de atenuación, uno para altura constante y distancia variable, que es el caso más común, otro para distancia constante y altura variable y finalmente, un modelo bidimensional que incluye a los dos y que es el que se presenta aquí.

En el modelo original [1], se trabajó con alrededor de 1000 valores de  $E$  obtenidos directamente de versiones ampliadas de las curvas. En este modelo mejorado, se utilizaron más de 4000 valores obtenidos mediante un programa disponible en la página web de la FCC [8]. Se intentó el ajuste de los valores con varios modelos, consiguiéndose el mejor con un modelo polinómico de 4º grado de forma:

$$n = \sum_{i=0}^4 \sum_{j=0}^4 a_{ij} h^i d^j \quad (5)$$

En que  $a_{ij}$  son los coeficientes de ajuste,  $h$  la altura de la antenna transmisora en metros y  $d$  la distancia en Km. La Fig. 1 muestra una comparativa entre el modelo de la FCC, el modelo aquí presentado y su predecesor [1] de la evolución

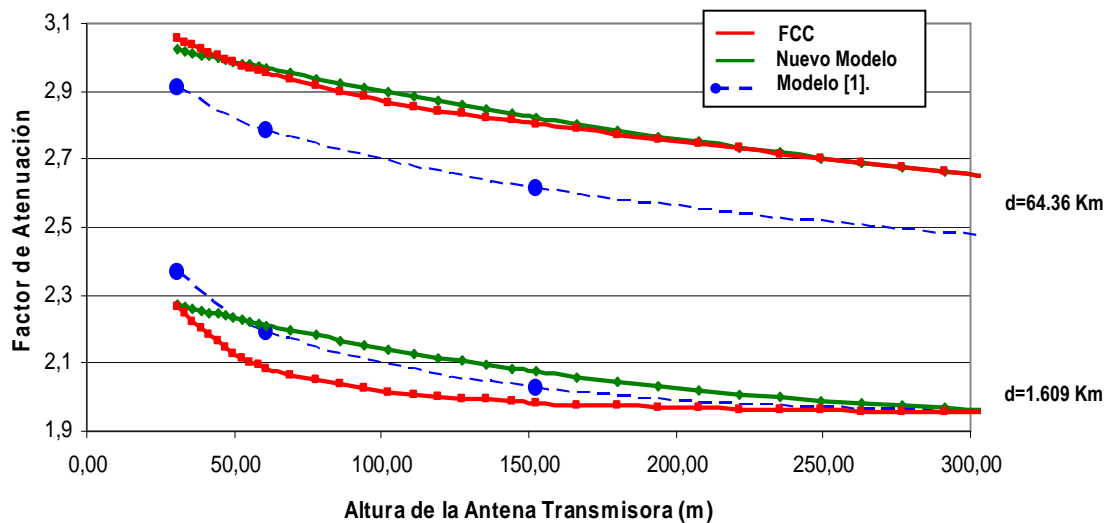


Fig. 1 Evolución del Factor de Atenuación 'n' en Función de la Altura de la Antena Transmisora en m. y la Distancia de la antenna en Km.

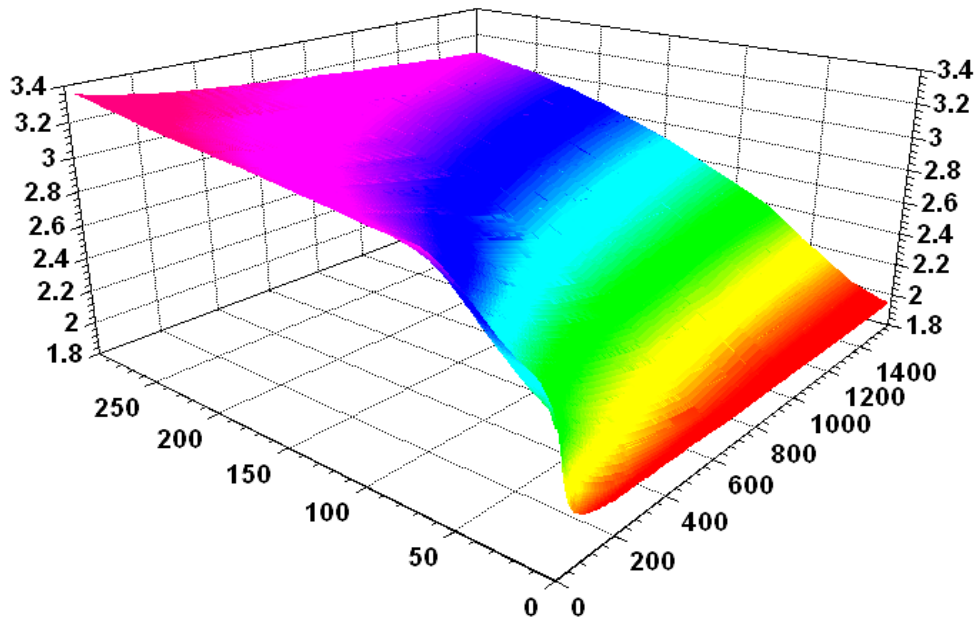


Fig. 2 Gráfico tridimensional del exponente de atenuación de la distancia  $n$  en función de la altura de la antena transmisora  $h$  en m. y de la distancia  $d$  en Km.

del factor de Atenuación  $n$  en función de la altura de la antena transmisora en m. y la distancia de la antena en Km. En la Fig. 2 se muestra un gráfico tridimensional de la variación del exponente de la distancia  $n$  con la altura de la antena transmisora  $h$  y la distancia del receptor a la misma  $d$  en Km.

El ajuste polinómico se realizó mediante los programas Stanford Graphics® y MATLAB®, para obtener los coeficientes  $a_{ij}$  que se dan en la Tabla I. Los datos, obtenidos mediante el programa de la FCC, dan lugar a un modelo más preciso que el original en que el error entre las muestras y los valores calculados con el modelo son menores. Los cálculos se realizaron para más de 1000 valores de altura de la antena transmisora en el rango de 30 a 1600 m y más de 40 valores de distancia, de 1.5 a 300 Km. Aquí hay que aclarar que la validez del modelo para distancias superiores a unos 80 a 100 Km debe tomarse con reservas.

#### IV. PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO

El modelo basado en la expresión (5) proporciona el valor del factor de atenuación en función de la antena transmisora y de la distancia a ésta. Para obtener el valor de la potencia recibida y de la intensidad de campo son necesarios algunos cálculos adicionales:

- Conocido el valor del factor de atenuación  $n$  mediante (5), la atenuación en dB puede calcularse mediante la expresión (2).
- La potencia isotrópica recibida se calcula ahora como:

$$P_{iso} \text{ (dBw)} = P_{rad} \text{ (dBw)} - L \quad (6)$$

- Finalmente, la intensidad de campo eléctrico se calcula de (3):

$$E = \frac{\pi}{\lambda} \sqrt{480 P_{iso}} \quad \text{V/m} \quad (7)$$

Aunque no existe un procedimiento definido para especificar el factor adecuado de corrección, la práctica usual es suponer que la intensidad de campo aumenta linealmente con la altura de la antena receptora [9], como indica la teoría clásica de propagación. Con esta suposición, la relación entre el campo estimado a 9 m y el campo a una altura de la antena receptora  $h_r$  es [10]:

$$\frac{E_{9m}}{E_{hr}} = \frac{9}{h_r} \quad (8)$$

Donde  $E_{9m}$  es la intensidad de campo a 9 m y  $E_{hr}$ , el campo a una altura  $h_r$  de la antena receptora. Los valores de los coeficientes obtenidos se muestran en la Tabla 1

Tabla de Coeficientes del modelo de propagación para la altura en m y la distancia en Km				
$a_{00}$ 2.30685	$a_{01}$ 2.33037 $\times 10^{-2}$	$a_{02}$ -2.29522 $\times 10^{-4}$	$a_{03}$ 9.47471 $\times 10^{-7}$	$a_{04}$ -1.34347 $\times 10^{-9}$
$a_{10}$ -2.41422 $\times 10^{-3}$	$a_{11}$ -2.71179 $\times 10^{-5}$	$a_{12}$ 7.27952 $\times 10^{-7}$	$a_{13}$ -4.02123 $\times 10^{-9}$	$a_{14}$ 6.57089 $\times 10^{-12}$
$a_{20}$ 5.20309 $\times 10^{-6}$	$a_{21}$ -6.02053 $\times 10^{-9}$	$a_{22}$ -8.36706 $\times 10^{-10}$	$a_{23}$ 5.79115 $\times 10^{-12}$	$a_{24}$ -1.03827 $\times 10^{-14}$
$a_{30}$ 4.4030 $\times 10^{-9}$	$a_{31}$ 2.7287 $\times 10^{-11}$	$a_{32}$ 4.26606 $\times 10^{-13}$	$a_{33}$ -3.71837 $\times 10^{-15}$	$a_{34}$ 7.15914 $\times 10^{-18}$
$a_{40}$ 1.2550 $\times 10^{-12}$	$a_{41}$ 1.1005 $\times 10^{-14}$	$a_{42}$ 7.88452 $\times 10^{-17}$	$a_{43}$ 8.74816 $\times 10^{-19}$	$a_{44}$ -1.78038 $\times 10^{-21}$

Tabla 1. Tabla de Coeficientes para la altura en m y la distancia en Km

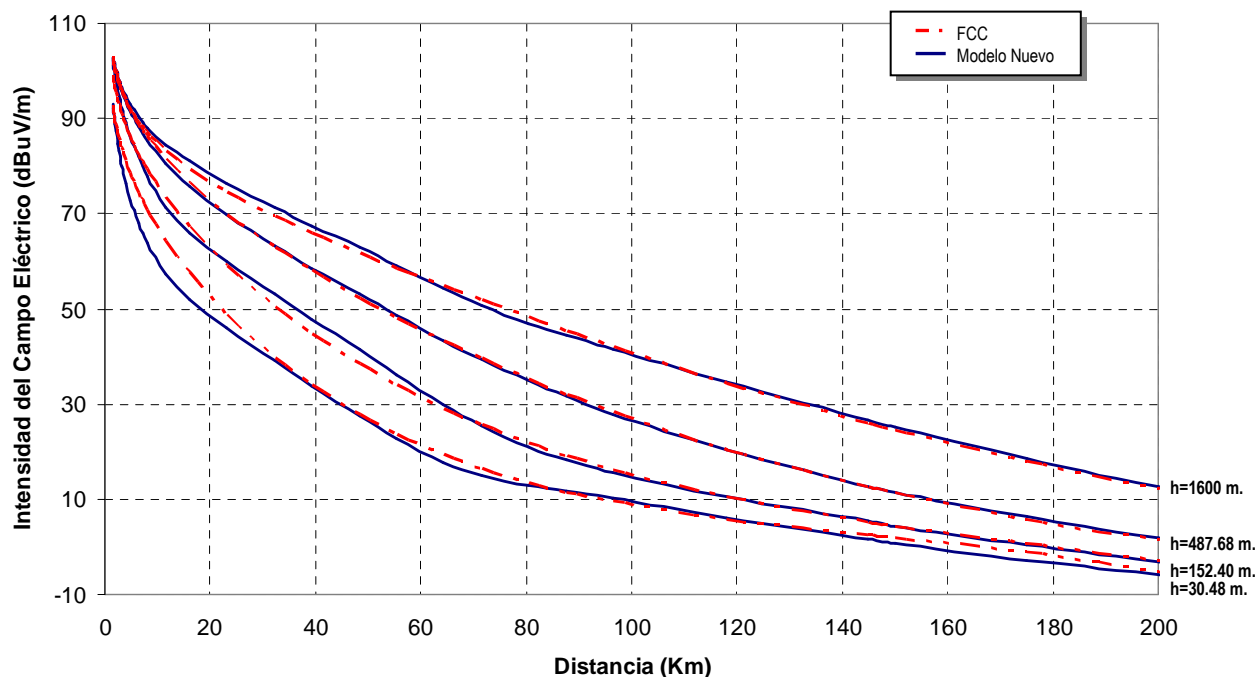


Fig. 3 Comparativa entre modelos para la intensidad de campo eléctrico en dBμV/m en función de la distancia a la antenna transmisora en Km.

## V. RESULTADOS DEL MODELO

El modelo aquí presentado se ajusta bien a las muestras de la intensidad de campo eléctrico en dBμV/m en función de la distancia a la antenna receptora en Km, tal como se aprecia en la figura 3. La línea discontinua corresponde a las muestras de la FCC y la continua a los resultados obtenidos a partir del modelo. Las desviaciones mayores, poco significativas, corresponden a alturas pequeñas de la antenna. Para distancias grandes la aproximación es muy buena, llegando a superponerse ambas gráficas.

El error medio para el factor de atenuación es de 0.9 % y corresponde a los valores más pequeños de las distancias. En cuanto al campo eléctrico, el error medio es de 4 % que corresponde a una desviación de 1.09 μV/m.as

## VI. CONCLUSIONES

Se ha presentado, un modelo muy semejante a su predecesor, que corrige algunas de las limitaciones de éste y como él, está basado en las curvas de propagación F(50,50), que reflejan datos experimentales fiables, no obtenidos de modelos teóricos. El parámetro utilizado para caracterizar la atenuación es el exponente de la distancia, en general, diferente de 2, el valor para el espacio libre. De este parámetro se pueden obtener el valor medio de la atenuación, la potencia recibida y la intensidad de campo eléctrico. El exponente de la distancia sigue bien una estadística de Nakagami, lo que permite dimensionar la potencia de un sistema para una fiabilidad mayor de (50,50).

El ajuste a las muestras, obtenidas aquí mediante un programa de cómputo de la propia FCC, puede considerarse muy bueno y no se requiere de ningún esfuerzo significativo de cálculo. El modelo es de aplicación sencilla en la práctica de la ingeniería, en aplicaciones en que no es necesario

mayor conocimiento de la dinámica del canal. El modelo es, además independiente de la frecuencia.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren expresar su agradecimiento por el soporte proporcionado para el presente trabajo al Ministerio de Ciencia e Innovación a través del proyecto TEC2008-06684-C03-01.

## REFERENCIAS

- [1] Pérez-Vega, C. and Zamanillo, J. M<sup>a</sup>, "Path-loss Model for Broadcasting Applications and Outdoor Communication Systems in the VHF and UHF Bands". IEEE Trans. on Broadcasting. Vol. 48, N° 2, June 2002. pp. 91-96.
- [2] Constantino Pérez-Vega, José M<sup>a</sup> Zamanillo y Silvia Alonso. "Versión Mejorada de un Modelo de Propagación para Exteriores a Frecuencias de 50 MHz a 1 GHz". XX Sipsosium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio URSI-2005., Gandia 2005, CD-ROM de Actas ISBN: 84-9705-859-3.
- [3] Code of Federal Regulations, Title 47. Chapter 1. Federal Communications Commission. Part 73. Radio Broadcast Services. Secs. 73.683, 73.684 and 73.699.
- [4] Perez-Vega, C. and Garcia, J. L. "A simple approach to a statistical path-loss model for indoor communications". 27th European Microwave Conf. Proc. Jerusalem, 1997.
- [5] Cox, D. C. et al. "800-MHz attenuation measured in and around suburban houses". BTSJ, Vol. 63, N° 6, pp. 921-955. Aug. 1984.
- [6] Bach Andersen, J. Rappaport, T. and Yoshida, S. "Propagation measurements and models for wireless communication channels". IEEE Comm. Mag. Jan. 1995, pp. 42-49.
- [7] Prasad, M.V.S.N. "Path loss exponents deduced from VHF & UHF measurements over Indian subcontinent and model comparison". IEEE Transactions On Broadcasting, Vol. 52, No. 3, September 2006 pp. 290-296.
- [8] [http://www.fcc.gov/mb/audio/bickel/FM\\_TV\\_DTV\\_propagation\\_curve\\_s\\_graphs.html](http://www.fcc.gov/mb/audio/bickel/FM_TV_DTV_propagation_curve_s_graphs.html)
- [9] Barringer, M. H. and Springer, K. D. Radio Wave Propagation. Chap. 2.8 of NAB Engineering Handbook, 8th Ed. NAB, Washington, DC, 1992.
- [10] Stielper, J. W. The measurement of FM and TV field strengths (54 MHz – 806 MHz). Chap. 2.11 of NAB Engineering Handbook, 8th Ed. NAB, Washington, DC, 1992.